



TITLE:

CFRP積層板の製造時欠陥が樹脂支配型強度に及ぼす影響についての力学的機構の研究(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

新玉, 重貴

CITATION:

新玉, 重貴. CFRP積層板の製造時欠陥が樹脂支配型強度に及ぼす影響についての力学的機構の研究. 京都大学, 2018, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2018-03-26

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k21068>

RIGHT:

京都大学	博士（工学）	氏名	新 玉 重 貴
論文題目	CFRP 積層板の製造時欠陥が樹脂支配型強度に及ぼす影響についての力学的機構の研究		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) 積層板を用いた構造の品質保証において重要な製造時欠陥の一つであるボイドが、構造強度に及ぼす影響に関する力学的機構の解明を目標に、工学的な観点から研究した成果についてまとめたものであり、6 章からなっている。</p> <p>第 1 章は緒論であり、研究背景および本論文の目的を述べている。まず、CFRP の主要な適用分野である航空機を例に、CFRP の実機適用の状況、長所や短所を概説し、製造工程の管理の重要性を指摘した。また、製造工程の管理が十分できなかった場合などに生じる製造時欠陥の種類や特徴を述べた。製造時欠陥の一つであるボイドは、樹脂中に発生する微小な空隙で、強度への影響も大きいことが、これまでに明らかにされてきたが、ボイドが CFRP 積層板の強度低下を生じる力学的機構には解明の余地がある。これらより、CFRP の主な適用形態である積層板について、ボイドが、樹脂支配型強度に対して影響を及ぼす力学的機構を明らかにすることの必要性を述べている。</p> <p>第 2 章では、ボイドまわりの微視的ひずみを計測する手法の確立を目的とした。CFRP の 90°層の走査型電子顕微鏡 (SEM) 画像の画像解析によるひずみ計測手法を提案し、有効性を検討した。本章では、SEM 画像から繊維中心点を検出し、荷重変化に伴う繊維中心点の変位に基づいて、ひずみを計測した。この場合、荷重状態の異なる二画像から検出した同一の繊維中心点の位置精度がひずみ計測の精度を左右する。そこで、局所濃淡差法 (Local Area Gray level Thresholding Method; LAGT 法) を提案し、さらに、画像の二値化の前に、比較する二つの画像サブセット間の濃淡レベルを等しくする補正処理を追加した修正 LAGT 法を提案した。一般的な画像解析手法も候補として、精度の比較検討を行い、修正 LAGT 法が本研究での計測に合致した方法であるとの結論を得た。</p> <p>第 3 章では、最初のトランスバースクラック発生時の巨視的ひずみを初期破壊ひずみと定義して、ボイドが CFRP 積層板の初期破壊ひずみに影響を及ぼす微視的機構を明らかにすることを目的とした。ボイド体積含有率 V_v の異なる 3 種類の試験片を用いて、SEM 内において 3 点曲げその場観察試験を実施した。初期破壊ひずみは、V_v の増加に伴って減少することが確認された。別途取得した SEM 画像を用いて修正 LAGT 法によるひずみ計測を行い、ボイド周辺においてひずみ集中が生じていることを実際に観察した。また、弾性解のひずみ値との比較から、ボイド周辺で、局所的な塑性変形が生じていたことが示唆された。さらに、トランスバースクラックが発生した試験片の X 線コンピュータ断層撮影 (CT) による観察で、材料内部においても、トランスバースクラックがボイドを通過していることを確認した。3 点曲げ荷重の負荷点とトランスバースクラック発生位置の関係がボイドの有無により異なっていたことから、ボイドに伴うひずみ集中によりひずみ場が影響を受け、トランスバースクラック発生位置の違いとして表れたことが示唆された。これらの実験結果より、ボイド周辺におけるひずみ集中がトランスバースクラック発生に影響することで初期破壊発生ひずみが低下する機構を明らかとした。</p> <p>第 4 章では、ボイドに伴う応力集中が CFRP の樹脂支配型強度に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。製造時欠陥として意図的にボイドを発生させた CFRP 一方向積層板の</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	新 玉 重 貴
<p>平板とL字型の試験片を用いて、CFRP 積層板中のボイドの形状や分布に関する特徴と強度との関連を評価した．ここでは、通常の航空機の設計データを得る際などと同様の短冊形試験片を用いた試験を実施した．繊維直交方向引張強度（Transverse Tensile Strength; TTS）、層間せん断強度（Interlaminar Shear Strength; ILSS）、層間引張強度（Interlaminar Tensile Strength; ILTS）の3つの樹脂支配型強度に関する試験の結果、強度はいずれもボイド体積含有率 V_v の増加に伴って低下した．TTS と ILSS の V_v に対する強度低下率はほぼ同様で、ILTS の強度低下率は TTS や ILSS より大きかった．V_v に対する強度低下率の傾向が応力集中係数の大小関係と対応することが分かった．このことから、負荷形態の違いによる強度低下率の差異には、ボイドの形状と負荷方向との関係に起因する応力集中係数の差異の寄与が大きいことが示唆された．</p> <p>第5章では、ボイドによる応力集中とCFRP 樹脂支配型強度低下を定量的に関係づけるモデルの提案を行った．まず、第4章の試験で見られたボイド量と強度低下量に関係づける一つの仮説として、ボイドによる応力集中効果の総和に応じて、強度が低下する可能性を考えた．応力集中効果は、一般に、ボイドの形状や寸法の特徴に依存することから、X線CTによるボイドの位置、寸法、形状の測定と測定結果の統計的分析を実施した．その結果、CFRP 内部においてボイドは層間領域に均一に分布し、寸法およびアスペクト比が対数正規分布に従うことを明らかにした．また、寸法やアスペクト比に見られた相関関係が、寸法の自然対数を成分に持つ3次元確率ベクトルが3次元正規分布に従うことによることが示された．次に、樹脂支配型強度が脆性的な破壊様相を示すことから、最弱リンク仮説に基づくワイブルモデルによるモデル化を試みた．ここでは、ボイドによる応力集中効果が総和的に強度低下に影響することを前提とした．ボイドにより生じる応力集中効果の及ぶ領域の体積が、ボイド体積含有率 V_v に応じて変化することによって強度低下に寄与すると考え、強度の体積依存性と類似の効果によって強度低下を生じるモデルを提案した．樹脂支配型強度の代表として繊維直交方向引張強度（TTS）を対象に、測定したボイド寸法から応力集中効果を見積もった．応力集中効果を適切に見積もり、強度低下の感度係数を適切に選ぶことによって提案モデルでの説明が可能であったことから、V_v が上昇することによる強度の低下には、ボイドの応力集中効果と V_v が支配的であることが示された．本研究での提案モデルは、個々のボイドによる応力集中効果、V_v と強度低下の関係を定量的に結び付ける見通しが得られた点で有用である．また、X線CTによる詳細なボイド寸法の計測が一つの重要なツールとなると考えられる．</p> <p>第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している．</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) 積層板を用いた構造の品質保証において重要なボイドと呼ばれる製造欠陥と構造強度低下の関係について、独自の画像解析手法を提案することによってボイドが初期破壊ひずみ低下に及ぼす微視的破壊機構を明らかにするとともに、ボイドの応力集中効果と CFRP 樹脂支配型強度低下との関係について定量モデルの提案により検証し、CFRP 構造強度へのボイドの影響に関する力学的機構の解明を目標に工学的な観点から研究した成果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

- 1) 走査型電子顕微鏡 (SEM) 画像を用いたひずみ計測手法として、修正局所濃淡差法 (修正 LAGT 法) を提案し、その有効性を検証した。他の画像解析手法と比較して、提案する手法により、画像上における CFRP 内の繊維の位置検出精度が向上し、計測値が理論値とよく一致することを示した。
- 2) ボイド体積含有率の異なる直交積層板に対して SEM 内 3 点曲げ試験を実施し、画像解析によるひずみ計測と X 線コンピュータ断層撮影 (CT) による内部観察を行った。その結果、ボイドの多寡に伴うひずみ集中の傾向とクラック発生位置がボイドの影響を受けることを見出した。さらに、弾性解析との比較により、ひずみ集中に伴う樹脂の局所的な塑性変形により初期破壊ひずみが低下するという微視的破壊機構を明らかにした。
- 3) ボイドを含む CFRP 一方向積層板に対する負荷形態の異なる試験を実施し、ボイドの形状と CFRP 樹脂支配型強度の低下との関係を調べた。その結果、異なる負荷形態の強度に対する低下率の差異は、ボイドの形状と負荷方向との関係に起因する応力集中係数の違いと関係があることを示した。
- 4) X 線 CT によるボイドの位置、寸法、形状の測定と測定結果の統計的分析により、ボイドの寸法分布が対数正規分布に従うことを示した。この結果に基づき、ボイドによる応力集中効果の及ぶ領域の体積が、ワイブルモデルで仮定される強度の体積依存性と類似の効果によって強度低下をもたらすことを、定量モデルの提案と実験結果との比較により明らかにした。

以上のように本論文は、CFRP 構造の代表的な製造欠陥であるボイドが初期破壊ひずみ低下に及ぼす微視的破壊機構を実験的に明らかにするとともに、ボイドの応力集中効果が CFRP 樹脂支配型強度低下をもたらすメカニズムを微視的計測手法と定量モデルの提案により示しており、得られた成果は、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 30 年 1 月 19 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

要旨公開可能日： 年 月 日以降